



TITLE:

研究室紹介

AUTHOR(S):

CITATION:

研究室紹介. Cue 2013, 30: 13-33

ISSUE DATE:

2013-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/180104>

RIGHT:

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は、下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」に掲載)

電気関係研究室一覧

工学研究科(大学院)

電気工学専攻

先端電気システム論講座(引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野(萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野(土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野(小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野(和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研)

電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)☆

デバイス創生部門先進電子材料分野(藤田研)

情報学研究科(大学院)

知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座ディジタル通信分野

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研) #

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

エネルギー科学研究科(大学院)

エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野(下田研)

エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)

エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航空システム工学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

国際高等教育院

教養教育部(小山田研)

学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研)

先端電気システム論講座 (引原研究室)

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「非線形 MEMS 共振器を用いたメモリー及び演算素子の開発」

近年、非線形 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 共振器を用いたメモリー及び演算素子に高い注目が集まっている。MEMS とは、半導体微細加工技術により可動機械要素と電気要素を一体化した微小デバイスである。本研究室では MEMS の中でも、共振器に着目している。外部から強制的に励振された MEMS 共振器は、機械的な共振特性を利用し、センサやフィルタなどに応用されている。この MEMS 共振器においては、デバイスの材質による異方性などにより、外部励振力と振動の変位間の比例関係が保たれない場合が存在する。すなわち、MEMS 共振器は非線形特性をもつ [1]。本解説では、本研究室で実施している非線形 MEMS 共振器を用いた、新しい機能を有する先端的なデバイスの開発に関する研究の一端を紹介する。

上述の様に非線形 MEMS 共振器の応用の一つとして、本研究室では、メモリー及び演算素子（以後、MEMS メモリー及び MEMS 演算素子）の原理検証を進めている。MEMS メモリー及び MEMS 演算素子は、従来の半導体が使用できない高温環境や宇宙空間などにおいて使用可能、すなわち過酷環境に適している。また、ナノレベルの構造においては、既存の半導体メモリーや演算素子より消費電力が低くなると期待されている。さらに、複合論理回路と同等の演算を単一の MEMS 演算素子で行うことができるなど、次世代のキーデバイスとなる可能性がある。

図 1 に作製した MEMS 共振器の一例を示す [2]。中央にマス部を、そのマス部の左右に楕円状の電極を配している。この電極に電圧を印加することにより、楕円電極間に駆動力が発生し、中央のマス部が振動する。ここで、非線形特性により MEMS 共振器は、大振幅振動と小振幅振動の共存状態を持つ。この 2 種類の振動を“1”と“0”に定め [3]、MEMS メモリー及び MEMS 演算素子として使用する。なお、楕円電極は、駆動及び計測に使用し、外部の計測系は一切用いない [3]。

図 2 に、前述の非線形 MEMS 共振器を 2 つ使用し、結合することにより 2 ビットバイナリカウンタを実現した結果を示す。同図に示すように、共存する大振幅振動及び小振幅振動の切り替え制御により、カウンタ操作を実現した。すなわち、クロック毎に、2 つの非線形 MEMS 共振器の振動状態が 00、01、10、11 の順に切り替わっている [4]。この結果は、非線形 MEMS 共振器を用いた順序回路（演算素子）の基礎原理となることに加え、結合振動子系が制御できることを示した。従来忌避されて来た MEMS 共振器における非線形特性の応用の大きな一歩を提案することになった。

最後に、本関連研究は、京都大学グローバル COE プログラム、文部科学省地域イノベーションクラスター事業及び JSPS 科研費 # 21656074 の研究助成を受けたものであることを記す。

参考文献

- [1] V. Kaajakari, Practical MEMS, Small Gear Publishing, Las Vegas (2009).
- [2] S. Naik and T. Hikiyara, Characterization of a MEMS resonator with extended hysteresis, ELEX, 8 (5), 291-298 (2011).
- [3] A. Yao and T. Hikiyara, Reading and writing operations of memory device in micro-electromechanical resonator, ELEX, 9 (14), 1230-1236 (2012).
- [4] A. Yao and T. Hikiyara (submitted).

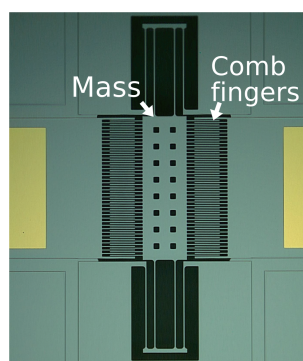


図 1 MEMS 共振器の概略

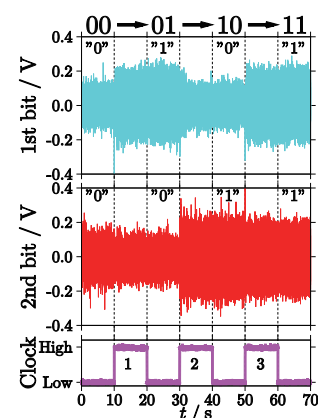


図 2 カウンタ操作

電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「薄膜超伝導線の電磁界解析」

イットリウムなどの希土類元素の銅酸化物の薄膜を金属テープの上に製膜した薄膜超伝導線 (図1) の開発が世界中で進められ、それを応用した電磁石や電気機器の開発が活発化してきています。例えば、液体窒素中で 300 A 近い電流を流すことができる幅 5 ミリ、厚さ 0.2 ミリの薄膜超伝導線も市販されています。線全体の厚さは 0.2 ミリですが、実際に電流が流れている超伝導層の厚さは 2 ミクロン程度であり、100 分の 1 平方ミリメートルの断面積に 300 A 近い電流が流れることになります。このような高密度で、さらには無損失で電流を流すことは銅線では考えられず、これをうまく使いこなすことができれば電気工学の分野で様々なイノベーションを起こすことが期待されます。

さて、様々な電気機器の開発において電磁界解析は今や必須の技術になっています。薄膜超伝導線を使った電気機器の研究開発においても電磁界解析の利用が期待されますが、話は簡単ではありません。例えば、銅線においては電流と電圧の間に比例関係が成立しますが (オームの法則)、超伝導線の電流と電圧の関係は極めて非線形です。つまり、電流が小さいときは電圧はほとんど零で、臨界電流という、いわば「電流の天井」付近で急激に大きな電圧が発生します。強い非線形性は計算の収束性を悪くします。また、幅 5 mm、厚さ 2 ミクロンといった非常に大きな断面アスペクト比も数値解析を行う上で障害となります。

われわれの研究室では、薄膜超伝導線の非線形な電流と電圧の関係や、電気機器の中における薄膜超伝導線の 3 次元的な形状を取り込みつつ、計算負荷をなるべく小さくするような解析手法について研究し、超伝導送電ケーブル、核融合装置や加速器に用いられる大型高磁界電磁石を構成するための大電流超伝導体、さらにはそれらの電磁石そのものの電磁界解析を進めています。図2は薄膜形状、3次元形状を考慮しつつ解析を行うためのモデルの例です。大ざっぱに言えば、超伝導薄膜に沿った3次元曲面上に格子を作り、その格子の上でファラデーの法則やビオサバルの法則に従って電磁界を計算します。図3は超伝導送電ケーブルの形状モデルの例、図4は大電流超伝導導体の立体形状の例です。

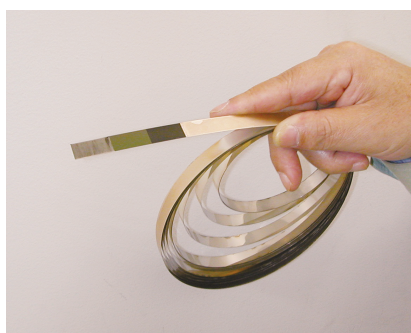


図1 薄膜超伝導線

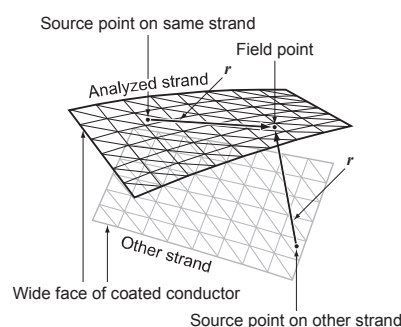
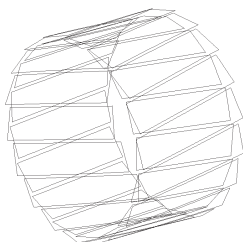
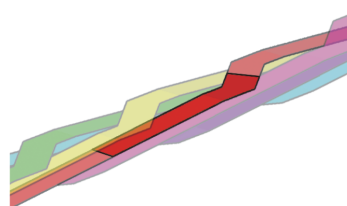


図2 解析モデルの概念図

図3 超伝導送電ケーブルの
形状モデル図4 大電流超伝導導体の
立体形状

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (松尾研究室)

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

「有限要素解析に基づく電磁力計算」

計算機による有限要素電磁界解析は、現在では、様々な学術研究に広く利用されるとともに、電気電子機器の設計・開発におけるコスト削減・開発サイクルの短縮への貢献など、産業界において大きな役割を果たしています。本研究室では、主な研究テーマの一つとして、有限要素電磁界解析技術の理論・応用に関する研究に取り組んでいます。ここでは、有限要素解析に基づく電磁力計算に関する最近の研究例を紹介します。

有限要素解析に基づいて誘電体・磁性体に作用する電磁力を計算する手法として、これまで様々な方法が提案・開発されてきました^{[1][3]}。その中でも、誘電体あるいは磁性体全体に働く合力だけでなく、力の局所的な分布を求める有力な方法として、マクスウェルの応力テンソルに基づく節点力法^[2]があります。

ここで節点力法を使用した際の問題点を説明するため、図1に示す簡単な2次元テストモデルを考えます。このテストモデルについて節点力法を用いて電磁力を求めた結果が、図2（磁性体の角部を拡大）です。マクスウェルの応力テンソルから求められる電磁力は、理論的には真空部分には現れないはずですが、図2では、有限要素解に含まれる誤差が原因となって、磁性体角部周辺の真空部分に力が現れています。本研究では、上述の問題を解消するための新しい電磁力計算法を提案しています。図3に示されるように、提案手法によって求めた電磁力分布からは、図2にみられるような不自然な振る舞いが取り除かれています。図4では、有限要素解析の格子の細密さを変化させながら、提案手法および節点力法を用いて磁性体全体に働く力を求めた結果を比較しています。提案手法では、比較的粗い格子を用いたときにも、細密な格子のときに近い結果が得られていることが分かります。

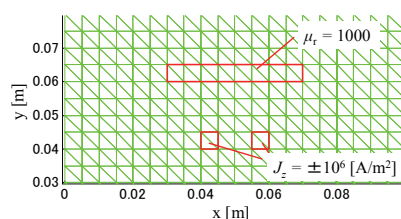


図 1: テストモデル

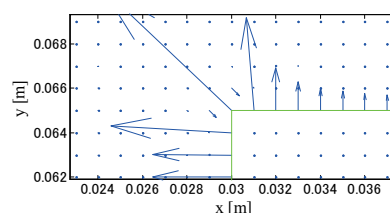


図 2: 角部周辺の分布力 (従来手法)

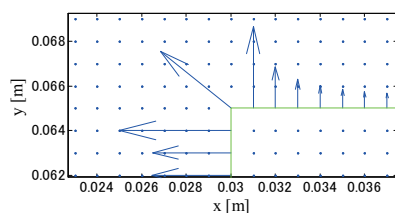


図 3: 角部周辺の分布力 (提案手法)

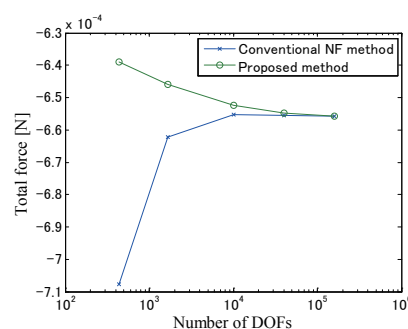


図 4: 磁性体全体に作用する力

- [1] Z. Ren, "Comparison of different force calculation methods in 3D finite element modeling," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 30, no. 5, pp. 3471-3474, 1994.
- [2] A. Kameari, "Local force calculation in 3D FEM with edge elements," *Int. J. Appl. Electr. Mater.*, vol. 3, pp. 231-240, 1993.
- [3] A. Demenko, W. Lyskawinski, and R.M. Wojciechowski, "Equivalent formulas for global magnetic force calculation from finite element solution," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 195-198, 2012.

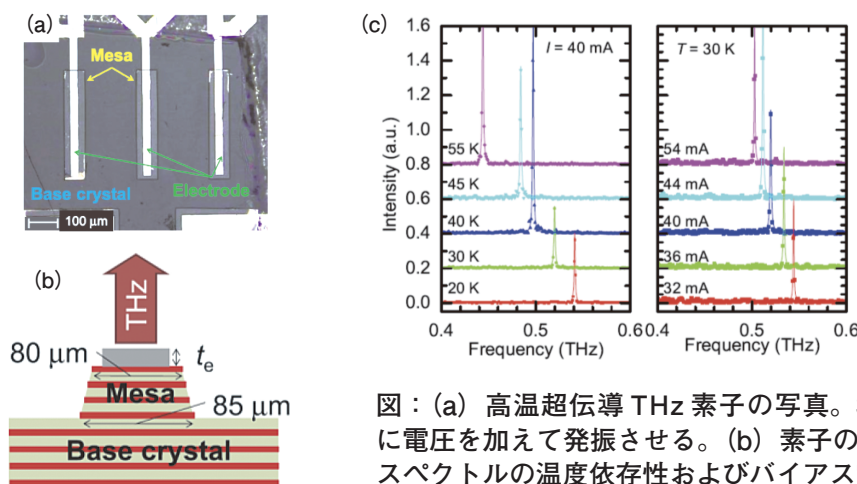
集積機能工学講座

<http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「高温超伝導体固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz) 領域はこれまでにコヒーレントな光源が得られていませんでした。電子の振動を利用するにも半導体の易動度の上限から周波数が制約され、量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要であるからと考えられてきました。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態（プラズマモード）が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。特に、高温超伝導体の典型物質の一つである Bi2212 では、結晶構造に由来するジョセフソン接合（固有ジョセフソン接合）により 100 GHz のプラズマ周波数と高い超伝導転移温度に由来する 50 meV に及ぶ超伝導ギャップのために、プラズマモードは安定に存在し、テラヘルツ領域に達する強力な電磁波が得られることが予言されてきました。様々な試みがなされた結果、2007 年に高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi2212) からの結晶外への THz 波が初めて観測されました。THz 発振のメカニズムは、交流ジョセフソン効果により励起された電磁波が Bi2212 単結晶からなる空洞共振器の共振条件に一致した時、積層するジョセフソン接合で同期した振動が起こり、0.3-1 THz の単色・コヒーレントな電磁波が発振されると解釈されています。

これまでの研究で、発振には積層するジョセフソン接合の位相が同期して振動することが必要であると指摘されていますが、交流ジョセフソン効果と空洞共振条件が満たされたときに常に発振するわけではなく、接合間の同期をもたらし条件は明らかになっていませんでした。そこで我々は、Bi2212THz 素子にバイアス電流を加える電極が素子内部で発生するジュール熱の逃げ道にもなっていることに注目し、電極の厚さを 30 - 400 nm の範囲で変えた素子を作成し、THz 発振の有無と発振条件を比較しました。図は電極厚さが 70 nm の素子から発振された電磁波の FT-IR 分光スペクトルです。50K において、400 GHz の中心周波数で装置の分解能以下の線幅を持つ単一のスペクトルが得られました。また、電極の厚さを厚くしていくと、発振が検出される温度範囲は狭くなり、400nm の厚さの電極を持つ素子では発振を検出することができませんでした。このことは、発振をもたらし同期現象にとって、薄い電極を持つ素子で実現されている温度の不均一な状態が必要であることを示しています。このように、超伝導体において温度の不均一性を積極的に活用するデバイスはいまだにこれまでになく、非常に興味深い研究対象であるといえます。



図：(a) 高温超伝導 THz 素子の写真。3つ見える個々のメサに電圧を加えて発振させる。(b) 素子の断面概念図。(c) 発振スペクトルの温度依存性およびバイアス電流依存性。

電子物理工学講座 極微真空電子工学分野

http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab16/index_j.html

「静電拡大投影法による軽元素含有材料の原子尺度構造解析の試み」

近年、分析の分野では、ナノ領域における元素分析と構造解析が同時に行うことのできる手法が望まれている。例えば、現代の大規模集積回路におけるトランジスタの大きさは数十ナノメートル程度になっており、MOS-FETの酸化膜厚は数原子層といった薄さまで来ている。このようなデバイスにおける故障解析においては、酸化膜中のどの位置にどの元素があるかを、原子一つ一つを手にとって調べるような分析が求められている。一方で、医学・薬学の世界でも、アミノ酸やタンパク質分子の構造を調べることが必要となっている。このためには、やはり原子ないしは最小の基単位的位置を同定する必要がある。金属材料に関しては、このような課題を克服する方法として、三次元アトムプローブと呼ばれる手法があり、現在では市販の装置も販売されている。三次元アトムプローブとは、針状の試料と対向電極を同心球構造とみなせるように配置し、表面の原子をイオンの形で脱離させたときにイオンの取る軌道が放射状となり、結果的に針上に近接して存在する原子が対向電極付近に飛来したときにその位置が大きく異なることを利用する。これを当研究室では静電拡大投影法と呼んでいる。金属の場合、針の表面に数十 V nm^{-1} 程度の強電界を印加すると、電界蒸発機構により金属表面の原子をイオン化することができることが知られている。この電界蒸発機構は金属に対してはある程度の理解が得られているが、軽元素に対してはほとんど理解が得られていない。この軽元素のイオン化をいかに行うかが重要なポイントとなる。

有機分子の三次元アトムプローブ分析を実現するためには、上記の静電拡大投を用いて有機分子の拡大像を得ることが当面の課題となる。金属の場合、電界イオン顕微鏡と呼ばれる手法で、針上の原子配置をスクリーンに映し出すことができる。この手法は、真空装置内に設置した針を液体窒素等で冷却したうえで、ヘリウムガスを流し、針に高電圧を印加することで導入したヘリウムをイオン化するものである。このとき、ヘリウムがイオン化する場所はタングステン表面にある原子位置となるため、ヘリウムによってタングステンの原子位置がスクリーンに拡大投影されることになる。図1はこのような手法で観察したタングステン表面の原子像である。個々の明るい輝点が原子一つに対応している。この手法により、現在、エタノールなどの有機分子をタングステン針上に塗布して観測するべく検討を重ねている。現時点でエタノールに由来すると考えられる輝点を観測しており、この輝点の詳しい分析を進めているところである。

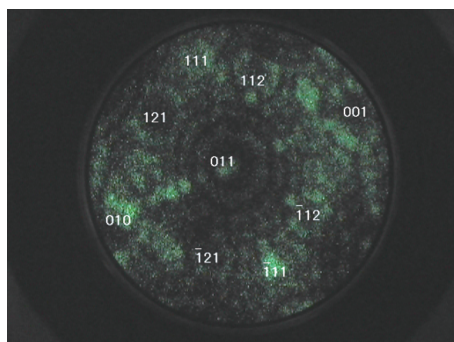


図1. タングステン針の電界イオン顕微鏡像。数字はタングステン表面にみられる面方位のミラー指数。

電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「超高耐压 SiC ダイオードの設計と作製」

変電所等の電力インフラ用変換器には、超高耐压のパワーデバイスが要求されます。例えば、国内における配電システムの電圧は6.6kVで、高圧直流送電では150～250kVという超高電圧の電力が扱われます。このような電力を変換（交流→直流、直流→交流など）する際、現在は、耐压6kV級のSiサイリスタが用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。このような超高耐压応用では、少数キャリアの注入を活用するSiC（炭化珪素）バイポーラデバイス（PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT等）が有望です。

しかしながら、高電圧应用到に有利なSiCと言えども、実用化の目処が立っているのは約1kV級のデバイスであり、10kV超級のデバイスを実現するためには、結晶およびデバイス作製の両面において、様々な課題が屹立しています。例えば、厚さ100 μm 以上、残留不純物密度 10^{14}cm^{-3} 以下、キャリア寿命10 μs 以上の高品質結晶を作製する必要があります。また、デバイス作製においても、10kV超級は未踏領域であり、その高電界による異常放電や端部での破壊の抑制が大きな研究課題です。そのような超高電圧でデバイス特性を精密に計測する技術も確立しなければなりませんし、SiCの特徴である高温動作も実証する必要があります。本研究室では、近年、高純度SiCの結晶成長に成功し、点欠陥低減によるキャリア寿命の大幅な増大を達成しました。今回は、SiC 超高耐压ダイオードの原理実証を行った結果について紹介いたします。

まず、PiN ダイオードを取り上げて、接合端部における電界集中を緩和する構造の研究を行いました。SiCでは表面制御技術が未成熟であるために、高密度の表面電荷が存在しますが、このような状況でも、簡易な作製プロセスで安定して高い耐压を達成できる構造を考案しました。数種の有望な構造について二次元数値計算を用いて設計し、最適な接合終端構造を実デバイスに適用しました。また、高耐压を得るために、ドナー密度 $2 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ140～180 μm の高純度SiC結晶を準備し、エピタキシャル成長によりpn接合を形成しました。ドライエッチングによる改良ベベル構造、イオン注入を用いた上述の接合終端構造の形成を経た後、電極形成、表面保護膜を形成してダイオードを完成させました。

図1に作製した12kV級SiC PiN ダイオードの逆方向特性を示します[1]。漏れ電流はpA～nAレベルと小さく、直流測定にも関わらず、絶縁破壊を起こしても素子の物理的破壊に至らない堅牢さを実証することができました。図2に180 μm のSiC厚膜結晶を用いて作製したダイオードの電流－電圧特性を示します[2]。このダイオードで得られた21.7kVの耐压は、いかなる固体素子の中で最も高い耐压です。このような超高耐压素子にも関わらず、高い順方向電流が得られており、SiCデバイスが超高耐压応用で有望であることを示す結果となっています。

[1] H. Niwa et al., IEEE Trans. Electron Devices **59**, 2748 (2012) .

[2] H. Niwa et al., Appl. Phys. Express **5**, 064001 (2012) .

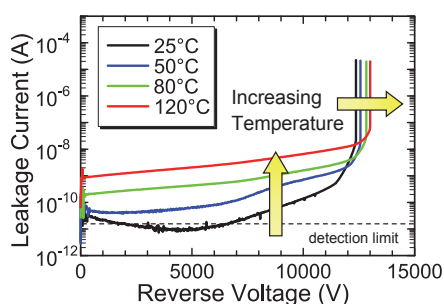


図1 12kV級SiC PiN ダイオードの逆方向特性

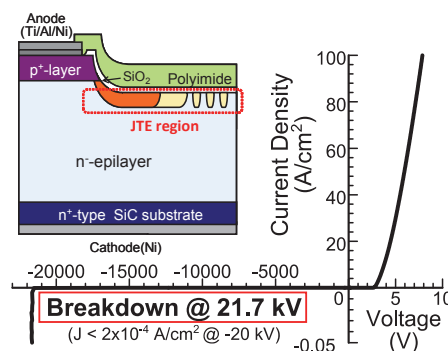


図2 SiC 厚膜結晶を用いて作製したPiN ダイオードの特性

量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「二探針近接場光学顕微鏡によるプラズモン導波の観測」

金属中に存在する自由電子の集団的な振動をプラズモンという。この振動は、電子の疎密波なので、プラズモンの伝搬方向と電場の方向が平行な縦波である。そのため、光などの伝搬方向と電場が直交する電磁波とは相互作用しない。一方、金属表面や金属と誘電体の界面では、プラズモンの伝搬方向と空气中、あるいは誘電体中に染み出した電場の方向が直交するため、光との相互作用が可能となる。このようなプラズモンは物質表面に局在しているため表面プラズモンと呼ばれ、また、光と結合した状態は表面プラズモンポラリトンと呼ばれる。表面プラズモンの最大の特徴は、波数が常に自由空間中の光のそれよりも大きく、さらに、速度が常に光よりも遅いことである。近年、この特徴を利用し、ナノ光回路、高感度ナノ分光、高効率光デバイス、ナノ加工、バイオセンサー (DNA・タンパク質・ウイルス・抗体などの検出) など、表面プラズモンが幅広い分野へ展開されつつある。また、このようなプラズモンと光の相互作用を利用した科学技術は、プラズモニクスと呼ばれ、新しい光科学技術分野として注目されている。

上述の様に、表面プラズモンは、伝搬光よりも波数が大きいため、金属に伝搬光を直接照射しても相互作用は起こらない。そのため、表面プラズモンポラリトンを形成するためには、エバネッセント波や近接場光を介する必要がある。通常、全反射減衰 (ATR) 法、グレーティング結合法、ナイフエッジ法、近接場光学顕微鏡 (SNOM) が用いられる。これまでのナノ光導波路における表面プラズモンの伝搬特性の観測には、(1) ATR 法により光照射し SNOM により観測する方法や (2) SNOM により光照射し、導波路端からの散乱光を観測する方法が用いられてきた。しかし、(1) の方法では、数十から数百平方マイクロメートル以上の領域に光が照射されるが、表面プラズモンをナノ光導波路に利用するためには、ナノメートル領域で表面プラズモンを励起する必要があるため適さない。また、(2) の方法では、ナノ光導波路を伝搬した後の情報しか観測できず、途中の光導波路上の表面プラズモンの伝搬特性が分からないため、不都合である。そこで、我々は、開口型の近接場プローブを二本備えた SNOM (本研究室にて開発) を用いて、局所的に表面プラズモンを励起し、伝搬する表面プラズモンを局所的に検出することで、表面プラズモンの伝搬特性の詳細な評価を試みた。

表面プラズモンの伝搬を二探針 SNOM によって観測した結果の一例を図 1 (a) と (b) に示す。図 1 (c) と (d) は、表面プラズモンの伝搬を有限差分時間領域 (FDTD) 法によって計算した結果である。また、図 1 (a) と (c) は $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ の銀平板構造、(b) と (d) は幅 $3.4 \mu\text{m}$ 、長さ $30 \mu\text{m}$ の銀細線構造の結果であり、図中の丸は光励起した点を示している。銀平板構造と銀細線構造の表面プラズモンの伝搬の観測結果を比較すると、銀平板構造では表面プラズモンが励起点からほぼ同心円状に広がって伝搬していた。それに対し、銀細線構造では、表面プラズモンの伝搬に干渉縞が形成されていた。さらに、銀細線構造では、銀平板構造に比べ、プラズモンの伝搬距離が長くなっていることが分かった。これは、細線の両端で表面プラズモンが反射し、元の表面プラズモンの波と干渉したためである。これらの結果は、計算結果と良く一致しており、表面プラズモンの伝搬の実測に成功したと言える。

参考文献

- [1] R. Fujimoto, A. Kaneta, K. Okamoto, M. Funato, and Y. Kawakami, *Appl. Surf. Sci.* **258**, 7372 (2012) .
- [2] A. Kaneta, R. Fujimoto, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato, and Y. Kawakami, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 083709 (2012) .

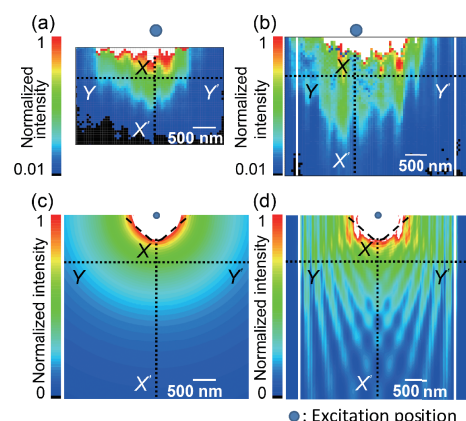


図 1 (a) 銀平板構造と (b) 銀細線構造の表面プラズモンの伝搬を観測した結果。(c) 銀平板構造と (d) 銀細線構造で表面プラズモンの伝搬を FDTD 法により計算した結果。

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野 (藤田研究室)

<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>

「第4のパワーデバイス材料を目指して：酸化ガリウム半導体の研究」

電気の利用における省エネルギーを達成することはわれわれ研究者・技術者の使命であり、電力変換・電力制御や高周波増幅に用いられる高耐圧・パワーデバイスの開発・進化には大きな期待が寄せられている。いまこの分野をリードしている半導体材料はSiCで、SiCを用いたパワーデバイスが地下鉄車両やエアコンに搭載され、省エネルギーを実現^{1,2)}したとともに、その安全性の実証につながっている。また、耐圧21.7kVときわめて大きいpinダイオードも報告されている³⁾。もう一つ実用化されている半導体材料がGaNである。GaNは基板の問題でSiCのように大電流を流すようなデバイスには不向きであるが、高周波増幅や低電流の電力制御を担うパワーモジュールに用いられている⁴⁾。一方、耐圧やオン抵抗について極限性能を目指す観点でダイヤモンドを用いたデバイスの研究開発が行われている⁵⁾。

新しい半導体デバイスの進展は、新しい半導体材料の開発に負うところが大きい。その観点でわれわれはパワーデバイスのための第4の半導体材料として、酸化ガリウム (Ga_2O_3) に注目した研究を進めている。表1に各種半導体材料の基本特性を示す。 Ga_2O_3 はSiCやGaNに比べてバンドギャップが大きいことから絶縁破壊電界が高くなる。また Ga_2O_3 の大きな特徴として、サファイア基板の育成に用いられるのと同様の溶融法により基板が作製できるという点が挙げられる。半導体デバイスにおいて基板＝基盤であり、薄膜の結晶成長とデバイス作製が先行して基板の開発が後発となった感のあるSiCやGaNと違い、 Ga_2O_3 には基板の開発が先行したという特徴がある。この点に注目し、われわれは、(株)タムラ製作所、(株)光波、情報通信研究機構、東京工業大学との共同研究体制により、2011-2013年度にわたりNEDOからの助成を受け、 Ga_2O_3 を用いたパワーデバイスの可能性を明らかにするフェーズで研究を行っている。これは世界的に例がない日本発の特徴ある研究で、基盤技術が着実に蓄積されつつある^{6,7)}。日本の独自技術として世界をリードし、従来研究されている材料に何かを加える貢献をなしたいと願っているとことである。

- 1) 三菱電機 (株) : プレスリリース 2011 年 2 月 16 日、2012 年 9 月 27 日 .
- 2) 高須秀視 : 応用物理 **82**, 227 (2013) .
- 3) H. Niwa, J. Suda, and T. Kimoto: Appl. Phys. Express **5** (2012) 064001.
- 4) (株) 安川電機 : プレスリリース 2012 年 10 月 31 日 .
- 5) 鹿田真一 : 応用物理 **82**, 299 (2013) .
- 6) M. Higashiwaki *et al.*: Appl. Phys. Lett. **100**, 013504 (2012) ; K. Sasaki *et al.*: Appl. Phys. Express **5**, 035502 (2012) .
- 7) K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 020201 (2012) .

図1 各種半導体材料の基本特性

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$
バンドギャップ (eV)	1.1	1.4	3.3	3.4	5.5	4.8-4.9
電子移動度 (cm^2/Vs)	1,400	8,000	1,000	1,200	2,200	300(推定)
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	10	8(推定)
比誘電率	11.8	12.9	9.7	9.0	5.5	10

知能情報メディア講座 言語メディア分野 (黒橋研究室)

<http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

「自動獲得した大規模言語知識に基づく情報検索基盤」

Web 上には膨大な量の情報が存在しており、私達は、調べものや意思決定のために検索エンジンを日常的に使っています。しかし、言語のもつ多様性、曖昧性のために、既存の検索エンジンには大きな問題があります。たとえば「スマートフォンの電池切れを防ぐ方法」を調べるために、検索エンジンに「スマートフォン 電池切れ 防ぐ」というクエリを入力することを考えます。検索エンジンは、これらのキーワードが含まれるページのリストを返します。ここにおいて、たとえば「スマホのバッテリーを長持ちさせるには…」という文を含むページは、「スマートフォン」「電池切れ」「防ぐ」というキーワードがひとつも含まれていないために検索結果に現れないという検索漏れの問題があります。また、「スマートフォンの電池寿命の劣化を防ぐ方法」に関するページがこれらのキーワードを含んでいるために検索結果に現れてしまうという検索誤りの問題があります。

本研究室では、これらの問題を解決するために、大規模言語知識の自動獲得と、獲得した言語知識に基づく情報検索基盤の研究開発を進めています。ここにおける言語知識とは、人がもっているような常識的な知識で、ひとつには次のような同義語・句の知識です。

- スマートフォン = スマホ
- バッテリー = 電池
- 電池切れを防ぐ = 電池を 長持ちさせる

もう一つの言語知識として、次のような格フレームとよばれる知識を学習しています。格フレームとは、「誰がいつどこで何をどうした」を表す述語項構造を集約したものです。

- {機能, 方法, …} が {低下, 切れ, …} を 防ぐ
- {途中, タイミング, …} で {電池, バッテリー, …} が 切れる

このような格フレームに基づき、上記の例文から「方法が スマートフォンの電池切れを防ぐ」「スマートフォンの電池が 切れる」のような述語項構造を認識することができるようになります。これらの言語知識は、Web から収集した 100 億文規模の超大規模なテキストデータから、数千 CPU のスーパーコンピュータを利用して獲得しています。これによって、幅広い言語現象をカバーする知識となります。

我々は、さらに、これらの言語知識および述語項構造に基づく情報検索基盤 TSUBAKI を開発しています。TSUBAKI は、クエリとして自然文を入力することによって、キーワードに基づく既存の検索エンジンよりも正確な検索結果を返すことができることが特徴です。TSUBAKI の利用例として、本学の講義のスライドや映像を公開している京都大学オープンコースウェア (京大 OCW; <http://ocw.kyoto-u.ac.jp/>) の検索エンジンとして使われています (図 1)。

TSUBAKI は、単体の検索エンジンとしてのみならず、さまざまな Web サービスの中に組み込むことも可能です。たとえば、独立行政法人情報通信研究機構の情報分析システム WISDOM (<http://wisdom-nict.jp/>) の検索エンジンとして使われています。WISDOM は、「風力発電」や「クローン技術」のような賛否両論がある問題に対して、情報の発信者、多数・少数意見、肯定・否定意見などさまざまな角度から俯瞰的に調べることができるシステムです。

探すということは人間にとって本質的な知的行為です。また近年、スマートフォンを中心に音声インターフェースが急速に普及しつつあり、自然文で検索する機会が増えています。本研究室では、今後も、より正確かつ柔軟な情報検索基盤の研究開発に取り組んでいく予定です。



図 1 京大 OCW における
TSUBAKI による検索例

通信システム工学講座 デジタル通信分野

<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「グループモビリティを活用した Massive MIMO の研究」

携帯端末（3G HSDPA 系、LTE）や無線 LAN（IEEE 802.11n、802.11ac）では、周波数利用効率を向上する MIMO 多重伝送が実用化されています。ある瞬間に同じ周波数を利用するのは 1 つのユーザ端末のみであるためシングルユーザ MIMO と呼ばれており、LTE、802.11n に共通して 20MHz 帯域幅あたり 1 ストリーム（同じ周波数の情報 1 系統）最大 75Mbps の伝送が可能となっています。LTE では 2 ストリーム（同じ周波数で情報を 2 系統）伝送が、802.11n では 3 ストリーム伝送までが一般に普及しつつあります。

MIMO 多重伝送に利用できるストリーム数は伝搬環境に依存しており、多くのストリームを効率よく利用するためには伝搬路の多様性が必要です。実際、無線 LAN 802.11n の例でも、2 ストリームまではおおむね利用可能ですが、3 ストリームが可能な機器を用いてもストリーム数増加による伝送速度改善効果は強く環境に依存することが体験できます。同時に効率よく利用できるストリーム数を拡大し周波数利用効率を向上させるには、受信アンテナ数を増加させることやアンテナ間相関低減を狙ってアンテナを空間的に離して配置することが効果的です。しかし、これらでは物理的なサイズが増大してしまうため、携帯端末等では現実的ではありません。

このため、基地局から多ストリームを送信しつつ、少ないアンテナ数の携帯端末を複数同時に収容するマルチユーザ MIMO が盛んに研究されています。マルチユーザ MIMO では携帯端末側での信号分離を補助するために基地局側においてプリコーディングが行われます。このプリコーディングは伝搬路状況に合わせて行う必要があるため伝搬路の変化に弱く、携帯端末の移動速度が大きく制限されてしまう課題があります。

移動による伝搬路変化がユーザ間干渉を引き起こしますが、十分な受信アンテナ数（受信信号数）が利用できれば無線信号処理によりこの干渉を効果的にキャンセルできます。ユーザが密集している電車・バス内では対地速度は速いもののユーザ間の相対位置関係に大きな変化はなく、携帯端末間には安定した通信が期待できます。このことを利用して、各ユーザの携帯端末間に近距離の安定した協力関係を築き、グループとして利用することによって同一移動体内に超多素子の仮想アレイアンテナを構成すれば飛躍的に伝送特性が向上する可能性があります。近年の携帯端末は複数の無線インタフェースを備えることが多く、これらを活用して携帯端末間の協力関係を築くこともできるでしょう。本研究では、グループモビリティを活用したマルチユーザ MIMO 実現への基礎実験として、既に開発済みの 4×6 マルチユーザ MIMO 伝送実験装置を活用し、実際に屋外伝送実験を行いその改善効果を実証することに取り組みます。

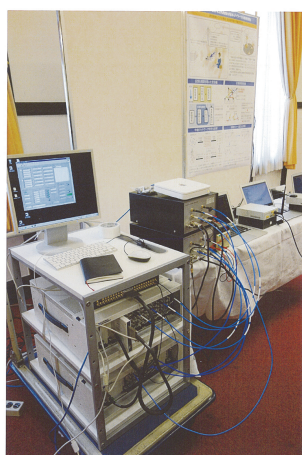


図 1 実験装置



図 2 概念図

集積システム工学講座 大規模集積回路分野 (小野寺研究室)

<http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「ランダム・テレグラフ・ノイズが集積回路の遅延に及ぼす影響の評価」

高度情報化社会を支える基幹デバイスである集積回路は、多大な研究開発努力により微細化、大規模化、高機能化が図られてきました。しかし、デバイスの寸法がナノスケールとなり、微細化に伴う各種の物理限界が顕在化しています。ゲート絶縁膜は物理限界近くまで薄膜化され、動作に伴う特性や信頼性の劣化が深刻になっています。当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。ここでは、トランジスタ特性の時間的な変動を引き起こすランダム・テレグラフ・ノイズ (RTN) の影響を評価した結果を説明します。

RTN とは、トランジスタを移動するキャリアが、ゲート酸化膜に存在する原子レベルの構造欠陥 (トラップ準位) に捕捉または放出されるのに連動して、トランジスタを流れる電流が離散的に変動する現象です。回路的な視点で見ると、トランジスタのしきい値電圧が時間とともに離散的に変動する現象と見ることができます。微細化によりチャネル内を流れるキャリアの数が減少し、RTN の影響が顕在化してきました。微細な素子が高密度に集積される CMOS イメージセンサ、フラッシュメモリ、SRAM では特に深刻な問題となっています。一方、ディジタル論理回路では、大きな寸法のトランジスタが使われることもあり、RTN の影響について深く検討されたことはありませんでした。しかし、集積回路を低い電源電圧で動作させる場合には、しきい値電圧のわずかな変動が大きな遅延変動に続きます。今後、低消費エネルギー化への強い要請より、動作電圧の一層の低減化が進むものと思われます。今回、実際にテストチップを試作して、RTN の影響を評価しました。

ディジタル回路を模擬する回路として、インバータで構成したリング発振回路を採用しました。発振周波数の揺らぎを観測することで、遅延時間の揺らぎを評価します。40 nm の製造プロセスを用いて、1 チップ上に色々な種類のリング発振回路をそれぞれ 840 個ずつ集積しました。最小のトランジスタ寸法で設計した 7 段のリング発振回路を 0.75 V で動作させたところ、10% 以上の回路で 1% を越える離散的な周波数変動を観測しました。その一例を図 1 に示します。明確な 2 値変動が生じています。周波数変動量の最大値 (ΔF) を最大発振周波数 (F_{\max}) で正規化し、840 個の回路について変動量の累積密度分布をとったものが図 2 です。この図には、段数やトランジスタ寸法の異なる回路の結果も示しています。論理段数の増加により、遅延揺らぎの影響は減少します。また、トランジスタ寸法を大きくすることで、その影響は大きく減少することがわかります。一方、電源電圧を下げると揺らぎ量は増大します。電源電圧 0.65 V では、最大 10.4 % の遅延揺らぎを観測しました。低電圧動作において、RTN が深刻な影響を及ぼす可能性がある事を確認しました。今後、RTN の影響を考慮した設計指針の開発に取り組みます。

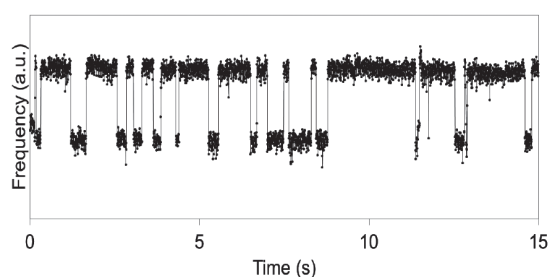


図 1. RTN による発振周波数の時間的揺らぎ

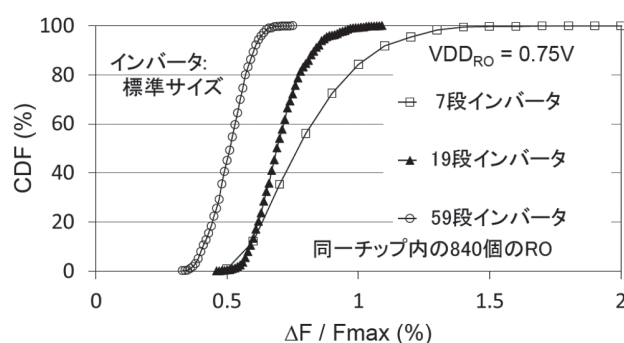


図 2. 発振周波数揺らぎの論理段数やトランジスタ寸法依存性

システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室)

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>

「計算機シミュレーションによる薬剤誘発性不整脈の解析」

重大な心臓疾患に不整脈がある。不整脈が発生すると心臓の収縮と拡張の正常なリズムが失われ、血液を全身に送り出す機能に障害が生じ、最悪の場合は死に至る。薬剤の副作用によって不整脈が偶発的に発生する薬剤誘発性不整脈は大きな問題となっており、本来心臓とは無関係であるべき抗アレルギー薬が不整脈を誘発するという副作用の恐れがあることが明らかとなり、発売中止に至った例がある。薬剤誘発性不整脈の主要な原因は、薬剤投与が心臓を構成している心筋細胞に影響を与え、早期後脱分極 (EAD) や遅延後脱分極 (DAD) と呼ばれる心筋細胞の異常な電気的活動を生じることである。心筋細胞の異常な電気的活動が発生する過程は複雑であり、未だ十分には解明されていない。また、薬剤の副作用による不整脈は薬剤投与により必ず発生するわけではなく、薬剤の投与量や個人の遺伝的形質あるいは生理状態に応じて発生確率が変化する。しかしながら、実際の細胞や組織を用いた実験によって様々な状況を詳細に解析することは困難である。そこで、当研究室では、不整脈の原因である心筋細胞の異常電気活動について、計算機シミュレーションを用いて発生メカニズムや発生条件を推定する研究を行っている。

心筋細胞の機能・活動を詳細に再現可能な数理モデルとして、京大医学部生理学教室で開発された Kyoto モデルがある。Kyoto モデルは細胞活動を形成するイオンチャネルをはじめとした主要な機能要素について、各々を分子実体に基づいて連立常微分方程式として定式化し、それらを統合することで細胞の活動を再現する。また、細胞実験結果に基づいて定められた分子実体に対応する様々なパラメータが含まれており、これらのパラメータを変化させることで、EAD、DAD などの異常電気活動を再現可能である。そこで本研究では、Kyoto モデルを用いて細胞の異常活動に起因する薬剤誘発性不整脈について解析を行った。

正常状態の Kyoto モデルに対して、薬剤投与の影響を反映するようパラメータを変化させるとともに、個人差や生理状態に関係する複数のパラメータを同時に変化させ、網羅的にシミュレーションを行うことによって、Kyoto モデルにおいて DAD が発生する条件に関する検討を行った。異常活動が生じるまでの時間や経過などを指標として不整脈発生の危険度を数値化し、実際の異常電気活動が発生する条件と危険度の推定を試みた。また、実細胞実験では測定できない生理活性物質の濃度変化などについても計算機シミュレーションでは取得可能であり、特定の実験結果に至った要因とプロセスに関する解析も行ったところ、DAD の発生については、興奮が生じる前の静止状態における細胞内カルシウムイオン濃度が極めて重要な指標であるとの知見が得られた。このようなシミュレーションにより、実細胞における異常電気活動の発生メカニズムの推定が可能となり、医薬品の開発段階における副作用の危険性の事前予測や、患者に応じた治療薬の選択などに繋がることが期待される。



図1 細胞モデルによる不整脈解析

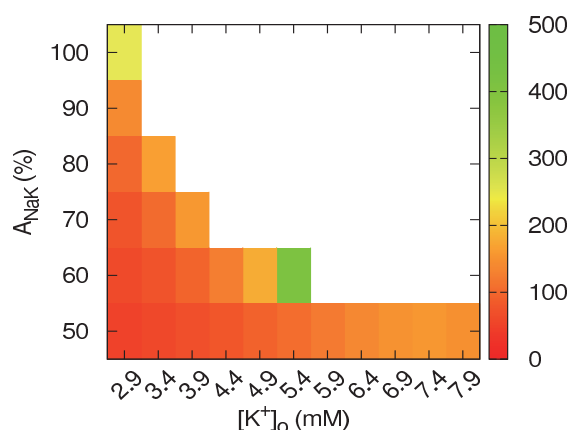


図2 不整脈危険度マップ (一例)

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「原子力発電プラント解体作業支援への拡張現実感技術の適用」

福島第一原子力発電所の事故以来、我が国では多くの原子力発電プラントが停止しており、特に 1970 年代に建設された発電プラントは運転開始からすでに 30 年以上経っているため、その解体・廃炉も検討されている。原子力発電プラントの解体の際には、放射性廃棄物を取り扱うことから十分な安全性と作業効率の向上を同時に実現する必要がある。しかし、原子力発電プラントには無数の機器や配管が存在し狭隘な場所も多く、解体の際には機器同士が干渉する等、作業スペースの確保が難しい。そのため、解体工程で発生する機器同士の干渉を 3DCAD と仮想現実感（Virtual Reality; VR）を用いたシステムにより評価することも検討されているが、評価に用いる 3DCAD データは実際の現場状況を正確に反映していない場合が多いため、正確な評価が難しい。

そこで、本研究室ではレーザレンジファインダを用いた 3 次元形状計測および拡張現実感技術（Augmented Reality; AR）を利用した解体機器の干渉を評価するシステムを開発した。これにより、解体作業計画立案者は現状を正しく反映したモデルで干渉を評価でき、接触箇所は現実の映像に重畳表示され示されるため、状況の直観的な理解が可能になる。提案するシステムは図 1 に示すように 2 つのサブシステムにより構成される。1 つは作業環境の形状を計測し、作業環境および機器の形状モデルを取得するシステムである。もう 1 つはタブレット PC をキャスタ付三脚に固定し、カメラで撮影した画像内に、取得した機器の形状モデルを重畳表示することで、機器の仮置・運搬される様子を把握することができるシステムである。作業環境および機器のモデルの相対位置を計算することにより干渉の有無を評価する。

さらに、開発したシステムの作業現場での有用性および受容性を評価するため、現在解体作業が行われている「ふげん」原子力発電所の解体作業担当者らに使用してもらった。評価手法にはヒューリスティック法を用い、アンケートおよびインタビューにより評価した。その結果、機器の形状モデルを現場に重畳表示することにより、仮置・運搬作業の様子が直感的に理解しやすいこと、および、仮置・運搬作業シミュレーションに用いるモデルとして、実際の解体作業現場を測定することにより得たモデルを用いることが有効であることが分かった。また、解体機器のモデルを立方体のオブジェクトの動きに合わせて移動する方法は直観的で簡単であることが分かったが、一方で、細かい操作指示は出しづらいこともわかった。今後は、このような拡張現実感技術を産業応用するための基盤技術のさらなる開発を進めていきたい。

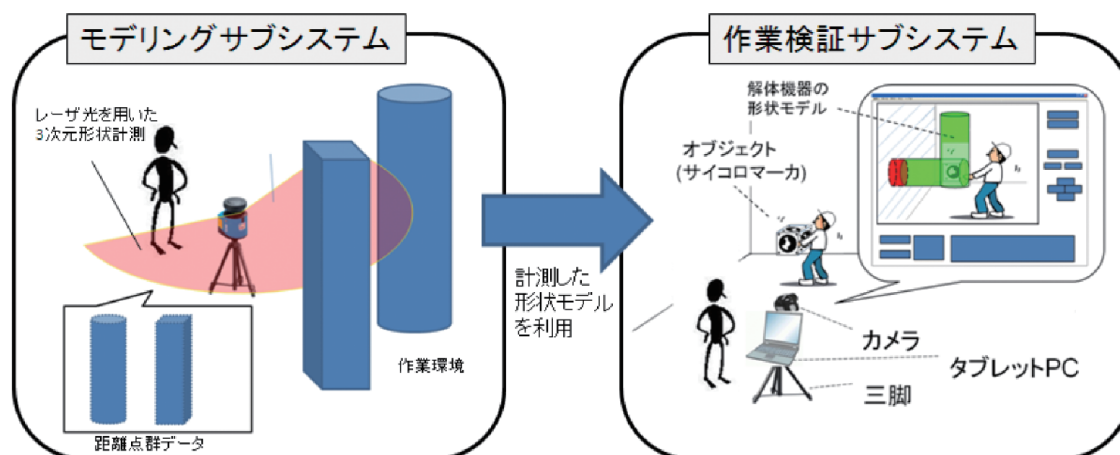


図 1. 拡張現実感技術を利用した原子力発電プラント解体作業支援システム

エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「集合組織金属を活用した高性能高温超伝導線材の開発」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器、リニアモーターカーなどの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる1群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に漬けて冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、この高温超伝導体を用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（GENESIS計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1]）。

我々は材料加工技術と成膜技術を融合することで、安価で工業生産に向けた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数kmの長さに渡って単結晶のように（3軸結晶配向）揃える新技術の開発に成功しています。具体的には圧延と加熱によって3軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ）の3軸結晶配向膜をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました（図1）。この線材を液体窒素に漬けて冷却（77 K）したところ、断面積 1 mm^2 当たり 200 A 以上の電流を電気抵抗ゼロで流せることが確認できています。現在、企業との共同研究等を通じて、実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は高温超伝導体に限らず、様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、太陽電池や熱電発電素子、燃料電池などへの応用も研究中です。

参考文献 [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.

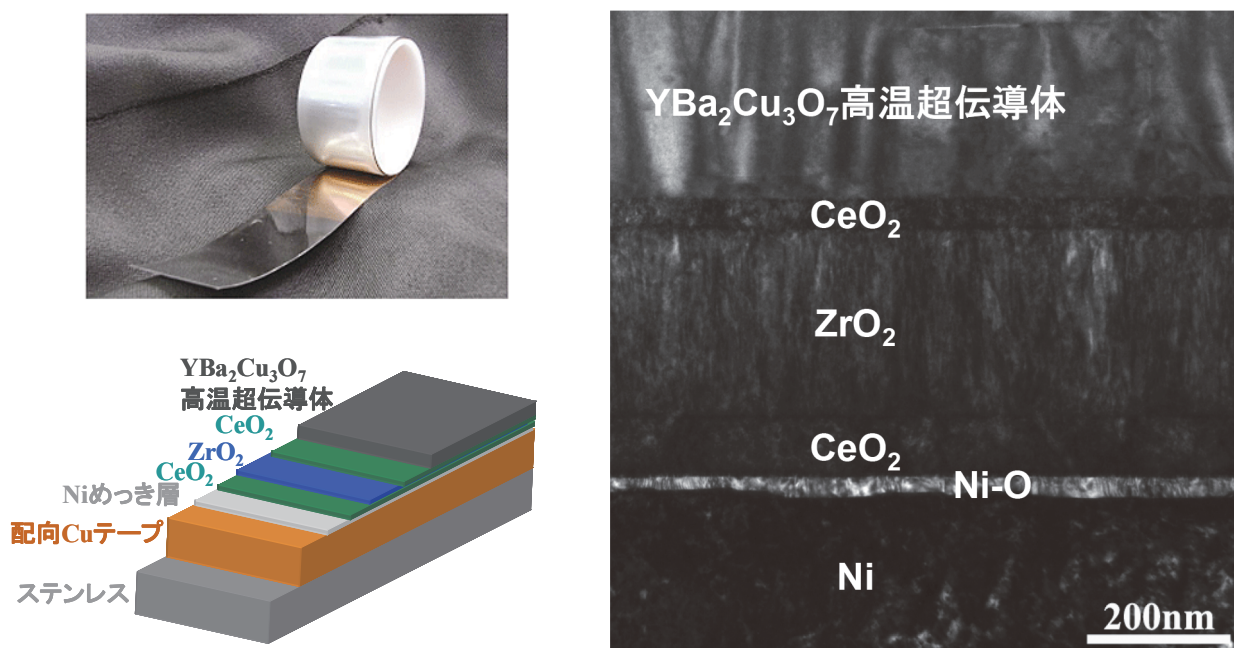


図1 開発した高温超伝導線材の概観、構造の概略図および断面の透過型電子顕微鏡写真

エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「液体水素冷却高温超伝導線材の磁場下特性測定」

1. はじめに

現在、科学技術振興機構 JST-ALCA のプロジェクトとして、電力・水素協調エネルギーインフラをめざした液体水素冷却超電導機器に視点を移し新たな実験を進めている。本研究では、液体水素の冷媒としての特性把握からスタートし、高温超電導機器冷却形態の検討とその冷却システムの設計、および、冷却システム要素技術開発、さらに、液体水素中での高温超電導線材特性、導体設計を段階的に進め、要素機器の検証モデル開発とその実証試験までを視野に入れている。今回は、液体水素で冷却した超電導材料の磁場下での特性測定試験を目的とした試験装置を設計製作したので概要を紹介する。

2. 液体水素冷却超電導材料特性試験装置

図に開発した液体水素冷却超電導材料特性試験装置の写真と主な仕様を示す。液体水素実験槽は、内径約 310mm で最大 61L の液体水素を貯液できる。トップフランジには、500A の電流導入端子を 3 端子設けた。この実験槽の下部に、外部磁場を発生させるため、液体ヘリウム槽に超電導マグネットを設置した。超電導マグネットは、175A で中心磁場最大 7T が発生できる。内径、高さとも 400mm で、この空間の中の水素槽がテストセクションとなる。14K から 31K の温度範囲でサブクール度を設定できるようにしている。磁場印加用マグネットの漏洩磁場によるバルブや計測・制御系への影響を検討し、適宜シールドなどを実施した。これらは JAXA 能代ロケット試験場に設置され、バルブ操作、電源操作、計測制御、モニターはすべて光 LAN を用いた遠隔操作で行えるようにし、安全に十分留意して実施している。

Table 1 Specification of Cryostats and magnet

Liquid Hydrogen Cryostat	
Inner diameter	309.5 mm
Height (bottom to top flange)	2218 mm
Volumetric capacity	61 L max
Withstand Pressure	2.0 MPa
Liquid Helium Cryostat	
Inner diameter	350 mm
Outer diameter	630 mm
Height (bottom to top flange)	1625 mm
Volumetric capacity	175 L max
Superconducting Magnet	
Material	NbTi
Inductance	112.36 H
Rated current	175A
Max. magnetic field	7 T



図 液体水素冷却超電導材料特性試験装置の写真

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanok/index.html>

「ヘリオトロンJ」における少数イオンモードでのICRF加熱による高速イオンの解析

核融合発電を目指す磁場閉じ込め方式のプラズマ研究は国際協力によるITERを中心として各国で進展しています。重水素、三重水素による核融合を考えた場合、反応によって生成される α 粒子の閉じ込めは重要な課題です。外部磁場のみで閉じ込め磁場を形成する単純なヘリカル系装置においては無衝突領域のリップル損失が存在するため、これを低減する磁場配位を考える必要があります。エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置では、この損失を低減する磁場配位を考案し実験を進めています。ここでは、磁場成分のうちトロイダル方向の磁場リップル（バンピネス）を変化させた場合の高速イオン閉じ込めについて、イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱を用いて実験的に調べた結果について紹介します。

プラズマは少数イオンの軽水素と多数イオンの重水素の混合プラズマを用いており、ICRF入射前のイオン温度は0.2keV程度です。このような2種イオンのプラズマにICRF加熱を行うと主に少数イオンにエネルギーが吸収されるため、高速イオンを容易に生成することができます。プラズマ中のイオンは中性原子との荷電交換反応によってプラズマ外へ排出されるので、これらの粒子を解析すればプラズマ中のイオンについて調べることができます。ヘリオトロンJでは水素、重水素を同時に計測することができる荷電交換中性粒子エネルギー分析装置が設置されており、様々な磁場配位に対して、計測視線角度を変えることでトーラス断面の水平方向、垂直方向の分布を観測することができます。下の図は軽水素のサイクロトロン共鳴層をプラズマ中心にした条件で、バンピネスを変えて、少数イオン高速成分のエネルギースペクトル変化を示したものです。ここでは水平角を固定して垂直角を変化させています。この加熱法ではICRFによる加熱エネルギーはほとんど軽水素イオンに吸収され、加速された軽水素イオンとのクーロン衝突により、重水素イオン、電子が加熱されます。図(a)はバンピネスが高い場合で、全体的に高速イオンが多く生成されているのが分かります。また、垂直角によってエネルギースペクトルが大きく変化します。また、このときバルクのイオン温度も最も高くなることが分かりました。図(b)は中バンピネスの場合でエネルギースペクトルの傾きは(a)の場合より急で、垂直角による変化も小さいという結果でした。図(c)は低バンピネスの場合で高速イオン生成が最も少なく、バルク加熱についても最小であることが分かりました。これらから、閉じ込め磁場成分の一つであるバンピネスの制御によって、高速イオンの生成・閉じ込めが変化することが実験的に明らかになりました。今後はさらに実験で得られた分布が、どのような物理機構で得られたかを明らかにするためにモンテカルロシミュレーションをもとに解析を進める予定です。

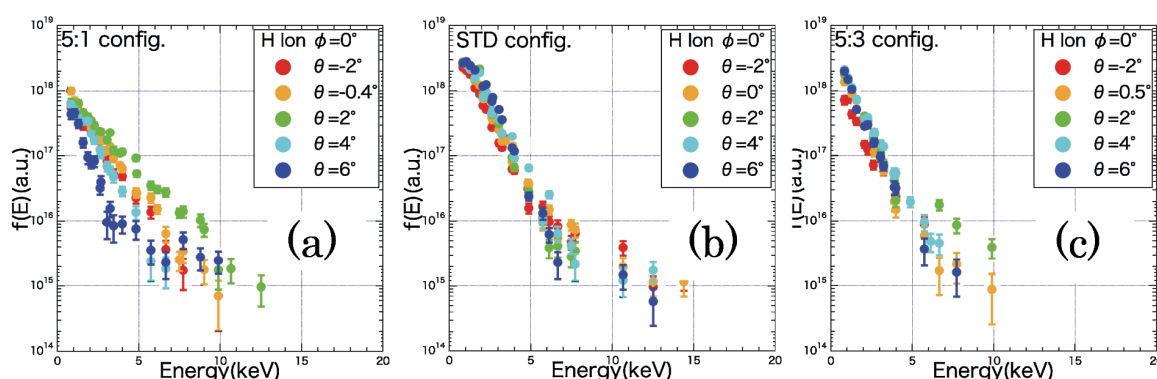


図1 実験で得られた少数イオンのエネルギースペクトルの垂直角 (θ) に対する変化。(a)は高バンピネス、(b)は中バンピネス、(c)は低バンピネスに対する実験結果。

生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (津田研究室)

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab

「ライダーで捉える大気物質の時空間変動」

大気中に浮遊する人為起源および自然起源のガス状および粒子状の物質は、大気環境を考慮する際の重要な要素となっています。例えば、大気中の主要な成分である水蒸気は、雲降水過程や大気物質の変質過程を通じて、気候変動や環境影響に寄与する因子として知られています。また最近では、中国からの越境輸送に伴う粒子状物質（エアロゾル）の増大が、社会的にも大きな注目を集めました。エアロゾルは、気管支や肺胞への沈着過程を経て喘息や肺がんのリスクを高めるなど、ヒトの健康にも影響を及ぼすことが懸念されています。安全で安心な大気環境を維持していくためには、大気の質を決める成分の動態を詳細に把握し、将来的な変動を正しく予測することが重要となります。発生源から放出された大気物質は、化学的性状を変化させながら、より空間的に広範囲な領域へと輸送・拡散されていきます。そのため、大気質の変動特性を精緻に理解するためには、変質に寄与する複数の大気成分と、輸送・拡散に影響する気象要素の時空間分布の把握が必要となります。

京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所（滋賀県）には、大気レーダーやラジオゾンデ放球設備など、上空の気象要素を観測する設備が充実しています。その利点を活かし、本研究課題では、MU 観測所を拠点として、大気成分の時空間変動の把握を目的としたライダーの開発を行ってきました。ライダーは、レーザーを用いたレーダー手法であり、光と物質の相互作用に伴う散乱現象を抽出することで、ある一方向の大気物質や気象要素の距離分布を得ることができます。我々のグループでは、入射光と散乱光の波長が変わらない弾性散乱と、入射光に対して散乱光の波長がシフトする非弾性散乱を、それぞれ検出するライダーを構築して、エアロゾル、水蒸気、気温の高度プロファイル観測に利用してきました。今までに、高度 10 km 以上の遠距離まで各成分を高精度で計測できる大型のシステムや、野外観測用に可搬性を高めた小型のシステムなど、観測条件に合わせた複数のライダーが開発されています。平成 24 年には、観測視野角を走査することでエアロゾルと水蒸気の鉛直断面分布を同時に計測する、走査機能を付加したライダーの運用を開始しました。走査型ライダーは、従来の一方向のみの観測では理解が難しかった、地表付近の水蒸気の拡散・輸送過程や、粒子の吸湿に関連したエアロゾル変質状態の空間的な不均一性など、局所的な大気現象の解明に役立つ観測を可能とします。

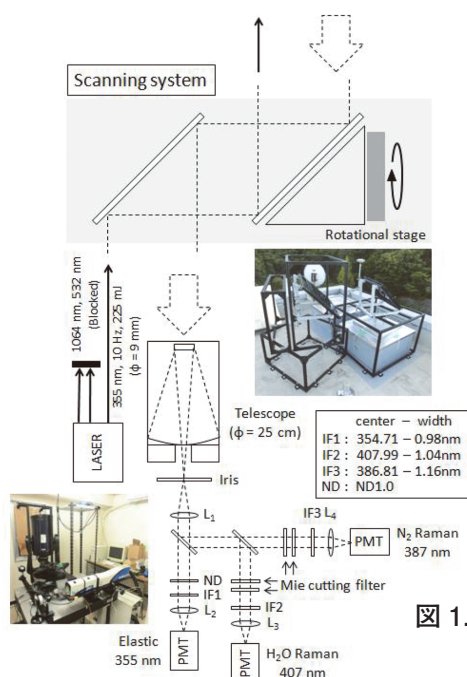


図 1. 走査型ラマンライダーの概要

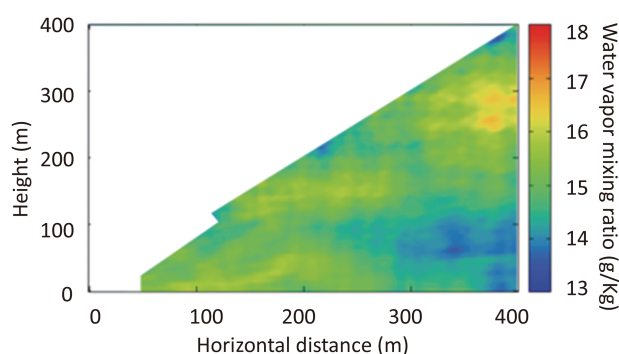


図 2：走査型ラマンライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面構造 (2012 年 8 月 28 日 22:17 JST)

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研究室)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/omura-lab/>

「低周波プラズマ波動による地球放射線帯電子のピッチ角散乱」

地球を取り囲む宇宙空間（ジオスペース）には、様々なプラズマ波動が存在している。図1は、クラスター衛星によって観測された数 Hz の低周波プラズマ波動である電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波のダイナミックスペクトルである [1]。最初一定であった周波数から新たに周波数が大幅に上昇する強い電磁放射が見られるが、これを EMIC トリガードエミッションと呼んでいる。このような強い電磁放射は内部磁気圏に運ばれてくる数 keV ～ 数 10keV の高エネルギープロトンとのサイクロトロン共鳴によって生成される。従来の研究においては、電子サイクロトロン周波数以下の数 kHz において同様の周波数変動を示すホイッスラーモードのコーラス放射が注目され多くの観測や統計解析が行われているが、ここで紹介する低周波の EMIC トリガードエミッションは過去の衛星観測でも注目されておらず観測例は少ない。我々の研究グループでは、コーラス放射研究の経験を生かして、EMIC トリガードエミッション発生 の非線形理論の構築 [2] と計算機シミュレーション [3] を世界に先駆けて実行し、観測されているような周波数上昇を伴うエミッションの発生メカニズムを定量的に解明することに成功した。高周波のコーラス放射が放射線帯の MeV のエネルギーを持つ相対論的電子を生成していることが分かってきているが、この相対論的電子は、EMIC 波と異常サイクロトロン共鳴して、図2に示す様に波の電磁的なポテンシャルにトラップされて非常に効率の良いピッチ角（ α ）散乱を受けることが分かってきた [4]。すなわち地球磁場に捕捉された相対論的電子は最初大きなピッチ角をもっているが、EMIC 波が作る空間的な電磁波の波束を電子が光速に近い速度で通り抜ける過程において、波の電磁界の空間的なスパイラル構造と電子のサイクロトロン運動が共鳴し、波の共鳴速度の上昇と共に、ピッチ角が急速に小さくなり、磁力線にガイドされて極域大気へと降下してゆくことが分かった。図1の左下の一つの EMIC トリガードエミッションの継続時間は 40 秒程度であるが、その短時間に同じ磁力線沿いに捕捉されている 1 ～ 6MeV の相対論的電子の約 50% がピッチ角散乱を受けて極域大気に降下することが分かってきた [5]。放射線帯電子は、キラーエレクトロンとも呼ばれ、人類の宇宙活動に大きな障害となっているが、人工的に EMIC トリガードエミッションを発生させることが出来れば、地球放射線帯の電子フラックスを制御出来ることを示唆しており、将来の宇宙利用の技術開発に通じる可能性のある重要な研究課題である。

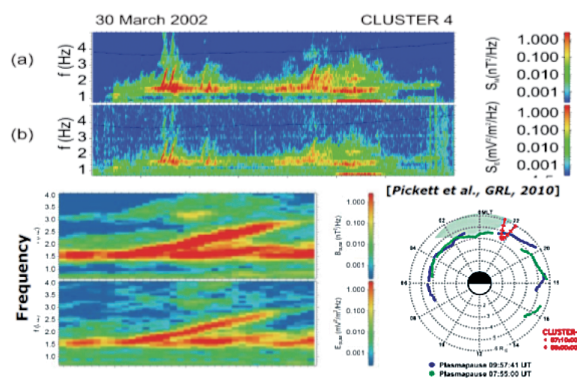


図1. EMIC トリガードエミッション (Cluster 衛星観測)

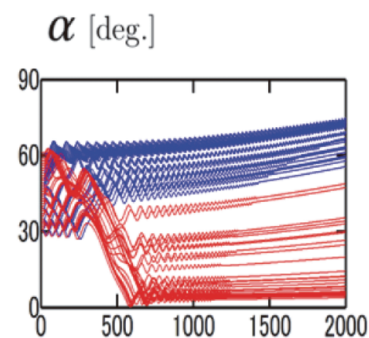


図2. EMIC トリガードエミッションにトラップされた相対論的電子（赤色）のピッチ角の時間変化

参考文献

- [1] J. S. Pickett, et al., Geophysical Research Letters, 37, L09104, doi:10.1029/2010GL042648, 2010.
- [2] Y. Omura, et al., J. Geophys. Res., 115, A07234, doi:10.1029/2010JA016280, 2010.
- [3] M. Shoji and Y. Omura, J. Geophys. Res., 116, A05212, doi:10.1029/2010JA016351, 2011.
- [4] Y. Omura and Q. Zhao, J. Geophys. Res., 117, A08227, doi:10.1029/2012JA017943, 2012.
- [5] 趙慶華, 京都大学工学研究科電気工学専攻修士論文 (平成 25 年 2 月)

国際高等教育院 (小山田研究室)

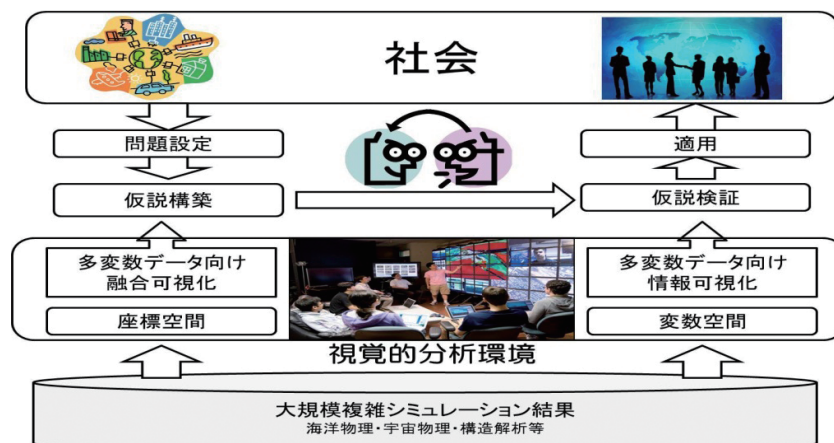
<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>

「科学的発見を促す視覚的分析技術」

計算科学シミュレーション結果から生成されるビッグデータは、多くの科学的発見をもたらす可能性を持ちながら、「ポスト」や「図化处理」といわれる可視化処理による定型的な現象確認に終わっています。この可視化は、科学的可視化と呼ばれ、シミュレーションモデルが定義される座標空間において実行されています。近年の計算機能力の向上によりシミュレーション結果のサイズは膨大となり、可視化において試行錯誤が困難となることがこの傾向を加速しています。

一方、ソーシャルネットワークや高性能センサーから得られるビッグデータからの知見を発掘するために可視化技術が広く用いられるようになってきました。これらは、情報可視化技術と呼ばれて、変数空間において、変数間の相関を確認するために利用されていますが、計算科学シミュレーション結果の可視化にはあまり活用されていません。

この問題を解決するために、本研究室では、右図に示すように、情報可視化と科学的可視化を連携させ、科学的発見を促す視覚的分析 (VA: Visual Analytics)^{1,2)} 技術を開発・整備しています。この技術を活用すれば、社会の声を可視化して問題を顕在化し、それらに対する仮説構築・検証を支援し、検証された仮説を社会に還元することを支援することができます。



文科省は、「科学技術イノベーション政策のための科学」に関する国際的な水準の研究・人材育成拠点を構築し、客観的根拠に基づく政策形成のための政策担当者、「政策のための科学」という新たな研究領域の発展の担い手となる研究者等の人材育成を行うことを決め、国内で五つの拠点が採択されました。京都大学も大阪大学とともにそのうちの一つの拠点 (<http://www.stips.kyoto-u.ac.jp/>) を担っており、本研究室もその教育研究に関わっています。科学技術イノベーション政策のための科学では、社会が直面する課題というものを抽出して、その中で科学技術がカバーできるものと社会システムの変革が必要なものと絞り込んでいって、それを政策メニューに落とし込み、社会に提供するという政策策定プロセスに注目しています。例えば、NSF (アメリカ国立科学財団、National Science Foundation) のジュリア・レーン (Julia Lane) は、投資に対してどの程度科学技術イノベーションが起きているか、実際に投資したお金がどのように有効に使われているかを、VA 技術を使って可視化しています³⁾。社会的課題を抽出し、政策メニューを社会に提供する上で、VA 技術は、大いに期待されています。

参考文献

- 1) J.J. Thomas and K.A. Cook (Eds.), Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics, IEEE Press, 2005.
- 2) Daniel Keim, Jörn Kohlhammer, Geoffrey Ellis and Florian Mansmann (Eds.), Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics, Eurographics Association, 2010.
- 3) J Lane, Let's make science metrics more scientific, Nature 464 (7288), 488-489

教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野 (中村裕研究室)

<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>

「筋電位計測と画像による姿勢計測を用いたリハビリテーション支援システムの設計」

リハビリテーションの場合は、患者自身で判断しながらトレーニング運動を続けなければならない場合がある。このような場合には、指示された運動を維持し続けることが難しいだけでなく、見かけ上似ているのにトレーニング効果の得られない代償動作が発生することが多い。自分の状態を客観的に把握するのが難しいために、「正しい姿勢」を保ちながら「正しい筋肉の収縮」を発生させること、またそれを繰り返すことが困難になるからである。我々は、京都大学附属病院と協力し、この問題を緩和するために、肩関節拘縮のリハビリテーションの支援システムの設計を行った。このシステムでは、画像による三次元姿勢計測と筋電位計測を組み合わせ、現在の状態のチェックや逸脱動作の認識を行うことによって、訓練者に正しいトレーニングが行われるようにフィードバックを与える。

リハビリテーションの現場でよく行われるのは、医師や理学療法士が正しい動作、または、可能な範囲で最も望ましいと考えられる動作を患者に指示し、それを患者が繰り返し再現する努力をすることである。そのため、本研究でも手本となる動作（以下、「基準動作」と呼ぶ）を時系列で記録しておき、利用者がそれを再現するように努力することを基本とした。

トレーニング時には、利用者が以下の様な情報提示を受けながら運動を行う。

- ・姿勢・筋収縮の状態、基準動作との重量・比較
- ・動作の逸脱、代償動作の検出結果と逸脱箇所、修正方法の提示

その提示情報の例を図に示す。支援システムは、計測結果を提示することにより、利用者が客観的に自分の状態を把握する補助を行うとともに、基準動作との差を意識させる。逸脱が起こっている場合には、該当箇所や理由・修正方法等を提示する。これにより、利用者が動作の修正を行いながら、所定のトレーニング動作を継続することを補助する。

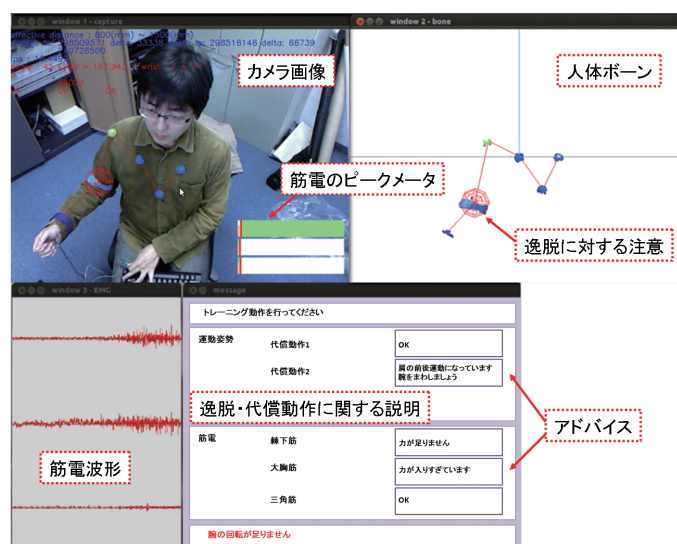


図1. 利用者への情報提示：現在の状態とともにアドバイスが提示される。

試作システムに対する患者、理学療法士の意見を得たところ、計測、情報提示、システム構成について、概ね良い評価を得た。情報提示については、説明の不足が指摘されたものの、図のような複数の提示方法を用意することの妥当性は示された。ただし、これらは、対象を肩のリハビリテーションに絞り、比較的単純なトレーニング動作を扱ったことに因るところも大きい。今後、より多様なトレーニング動作を扱うことによって、様々な検証を行なっていくことが必要である。なお、本研究はシステムの設計と試作の段階にあり、治療効果に対する継続的な評価は今後の課題となっている。